

Rudolf Diesel und der Carnot-Prozeß

Groth, Klaus

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 43, 1992,
S.177-189



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

Rudolf Diesel und der Carnot-Prozeß

Von **Klaus Groth***, Hannover

(Eingegangen am 13.11.1992)

1. Einleitung

Im Februar 1892 meldet der Ingenieur Rudolf Diesel, Leiter der Berliner Vertretung von Lindes Eismaschinen, beim kaiserlichen Patentamt zu Berlin ein Patent *Neue rationelle Wärmekraftmaschine* an. Die Patentschrift wird am 3. September, also vor ziemlich genau 100 Jahren, ausgelegt. Das Patent wird im Februar 1893, ein Jahr nach der Anmeldung, unter der geänderten Bezeichnung: *Arbeitsverfahren und Ausführungsart für Verbrennungskraftmaschinen* als „DRP 67207“ erteilt. Die Spanne dieses einen Jahres, die das Patentamt brauchte, gibt uns heute die Möglichkeit, die Gedenkkolloquien zeitlich gut zu verteilen: Zur Erinnerung an den Anmeldezeitpunkt fand im Frühjahr 1992 eine Veranstaltung an der Technischen Universität Otto von Guericke in Magdeburg statt. Zur Erinnerung an die Erteilung führt die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen F.V.V. im Februar 1993 ihre Hauptveranstaltung in Augsburg, der eigentlichen Geburtsstätte des Dieselmotors, durch. Auf internationaler Ebene veranstaltet der CIMAC (*Congrès Internationale Machine à Combustion*) im Mai 1993 in London eine Gedenktagung „One Century of Diesel-Engines – the Beginning and the world-wide Spread“. Mit der Patentanmeldung nahm eine Entwicklung ihren Fortgang, deren Durchsetzung die ganze geistige und psychische, aber auch physische Energie des Erfinders erforderte. Eine Entwicklung, aus der zugleich deutlich wird, welche Irrtümer, Schwierigkeiten, Enttäuschungen, aber auch welch erhebende Momente ein Erfinderleben wie das des Rudolf Diesel ausmachen.

Abweichend von der üblichen Gesamtdarstellung der technisch-historischen Abläufe sei hier versucht, einige wenige Umstände deutlich zu machen, die bei Diesel eine Rolle gespielt haben und die wir gewissermaßen exemplarisch für unsere eigene Arbeit ansehen dürfen. Man kann zweierlei zeigen:

- a) wie stark in der Studienzeit durch einen Vortragenden bekannten Namens prägnant Dargebotenes und Aufgenommenes später fortwirkt,
- b) welche Folgen eine dennoch nicht ausreichend durchleuchtete These bei einem Studierenden haben kann.

Für viele Fachkollegen geht von der Geschichte des Ottomotors – wohl wegen deren Verbindung zum Kraftfahrzeug und zum Motorsport im allgemeinen – die größere Faszination aus. Für andere, meist wohl ältere, bietet die Geschichte des Dieselmotors dagegen mehr, insbesondere wegen ihrer stärkeren Bindung an die Theorie. Dieser Dieselmotor, der 1897, also 20 Jahre nach Nikolaus Ottos Erfolg, der Öffentlichkeit vorgestellt wurde, ist sozusagen „wissenschaftlicher“ entstanden als der Ottomotor.

* Univ.-Prof. Hon.-Prof. Dr.-Ing. K. Groth · Schaftrift 18 · 3003 Ronnenberg 2

Er hat prinzipbedingt einen höheren Wirkungsgrad (vor einem Jahr wurden in Japan 56% erreicht!). Außerdem kam bei Diesel die Theorie, wie wir gleich sehen werden, vor dem Experiment. Meist war es damals umgekehrt: nach einem neuen experimentellen Ergebnis wurde die Theorie, meist von älteren erfahrenen Professoren, nachgeschoben, wenn die Maschine bereits lief.

2. Zum historischen Hintergrund

Am Anfang stand jedoch ein folgenschwerer thermodynamischer Irrtum des Erfinders. Er dauerte zwar nur ein knappes Jahr, die Folgen erstreckten sich jedoch über einen längeren Zeitraum.

Rudolf Christian Karl Diesel [1] [2], der 1858 in Paris als Sohn deutscher Eltern geboren wurde, besuchte während des Krieges 1870/71 die Schule in Augsburg. Er konnte dort bei Pflegeeltern billig wohnen und – hochbegabt und stets Klassenerster – mit Hilfe von Stipendien leben und dann ab dem 17. Lebensjahr am Polytechnikum München, der heutigen TU München, auch studieren. Dort legte er später das beste Examen seit Gründung der Anstalt ab. Eine der Motivationen für seinen Fleiß war ohne Frage Armut im Elternhaus.

Bei seinem späteren Firmenchef Professor Karl von Linde hörte er Vorlesungen über „*Mechanische Wärmetheorie*“. Es wurde damals, wie es auch heute geschieht, gezeigt, daß mit dem Carnot-Prozeß – Sadi Carnot hatte ihn 1824 publiziert – höchste Wirkungsgrade zu erreichen sind. Diesel war sofort klar, daß es sich um eine isotherme Energiezufuhr handeln müsse, und er machte auf seinem Kollegheft als Randnotiz einen besonderen Vermerk, nämlich: (sinngemäß) „Studieren, ob es nicht möglich ist, die Isotherme praktisch zu verwirklichen“. Diese Idee hat ihn dann nicht mehr losgelassen. Als Kälteingenieur bei Linde experimentierte er, was wenig bekannt ist, bereits mit einem Ammoniak-Dampf-Motor. 1893, also 14 Jahre nach der Randbemerkung im Kollegheft, arbeitete er seine Patentanmeldung aus. Im Anschluß daran folgte seine bekannte Schrift „*Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors*“. Das Denken der Ingenieure jener Zeit wurde von diesem ehern erscheinenden Carnot-Prozeß geprägt, und alles wurde auf die Dampfmaschine bezogen, welche die beherrschende Antriebsquelle in Fabriken, auf Schiffen und auf der Schiene war [3]. Als wesentliche Triebfeder für Diesels Idee muß der Umstand angesehen werden, daß trotz der sehr hohen Carnot-Wirkungsgrade die damalige, meist mit Kohle gefeuerte Dampfmaschine nur mäßige Wirkungsgrade von ca. 15% erreichte, weil nach Diesels Verständnis eben der Carnot-Prozeß nicht konsequent angewendet wurde und man auf den Dampf als Zwischenträger nicht verzichtete. Der Brennstoff selbst sollte stattdessen dem Arbeitsraum zugeführt werden. Diesel wollte sozusagen den „Zwischenhandel“ ausschalten.

Zur damaligen Zeit wurde nur die Frage nach dem maximalen Wirkungsgrad gestellt. Die Frage nach dem Mitteldruck bzw. nach der Literleistung einer ausgeführten Kraftmaschine kam bei den Thermodynamikern damals kaum vor. Das trifft zum Teil auch heute noch zu. Auch das Patent, das Rudolf Diesel im gleichen Jahr angemeldet hat, basierte auf dem Carnot-Prozeß. Dazu waren Spitzendrücke von 250 bar mit zwei-

stufiger Kompression vorgesehen. Der erste Teil der Kompression sollte mit Hilfe von Wassereinspritzung isotherm erfolgen, wie es der Carnot-Prozeß vorschreibt. Die Expansion hätte mit Wärmezufuhr auf einer Isothermen erfolgen müssen. Diesel rechnete mit einem Wirkungsgrad von 73%. In dieser ersten Patentschrift wird im übrigen eine Ausführungsform mit drei Verbundzylindern und Mehrfachexpansion von Diesel angegeben.

Die ersten Rückschläge erlebte Diesel, als sein Chef und früherer Hochschullehrer Karl von Linde den Bau einer solchen Maschine ablehnte und auch von der Maschinenfabrik Augsburg eine Absage kam. Das Problem waren die außerordentlich hohen Spitzendrücke, die Diesel im ersten Patent benannt hatte. Er war dann Realist genug, im Anschluß daran seine Ausarbeitung „*Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors*“ nur als Anhalt und sein Patent als Idealvorstellung abzuqualifizieren und im weiteren Schriftwechsel von weit niedrigeren Drücken, nämlich statt 250 oder etwa 150, später 90 bar, nur noch von 40 bar zu sprechen. Er veröffentlichte in diesem Zusammenhang auch Nachträge zu seiner „*Theorie und Konstruktion eines rationellen Wärmemotors*“. Im Frühjahr 1893 hatte er Erfolg. Der Vertrag zwischen Diesel und MAN wird geschlossen, auch Krupp in Essen kann er für sich gewinnen. Deutz in Köln kann sich nicht zu einer Zusammenarbeit entschließen.

Hätte Rudolf Diesel seinerzeit Überlegungen angestellt, wie sie heute in vielen Vorlesungen über Verbrennungskraftmaschinen bezüglich des Carnot-Prozesses vorkommen, so wäre ihm viel Zeit und jahrelanger Patentstreit erspart geblieben; dieser Streit, der auch Anlaß zu seinem Nervenzusammenbruch und zu einer Einlieferung in eine Nervenheilanstalt gewesen ist.

Aus den Veröffentlichungen von Eugen Diesel [1], einem Sohn Rudolfs, wissen wir, daß sein Vater sich gescheut hat, seinen Irrtum einzugestehen und stillschweigend knapp ein Jahr später eine Patentanmeldung nachgeschoben hat, in der kein Bezug zum Carnot-Prozeß mehr enthalten war. Eugen Diesel schildert die inneren Kämpfe, die damit verbunden waren, sehr fesselnd. Diesel hat verklausuliert mit seiner zweiten Patentanmeldung (DRP 82168 vom 30.11.1893) gewissermaßen das erste Patent aufgehoben, ohne daß es allgemein bemerkt worden ist.

Bis hierher haben wir gezeigt, daß Diesel der Faszination der sehr hohen Carnot-Wirkungsgrade erlegen war; wie er dann aber erkannte, daß es zweckmäßig sei, vom Carnot-Prozeß abzurücken, weil zur damaligen Zeit die technische Ausführbarkeit der sehr hohen Drücke nicht gewährleistet war.

Ob Diesel, um zu unserer zweiten These von der nicht ausreichenden Durchleuchtung zu kommen, bereits zu diesem Zeitpunkt erkannt hatte, daß der Carnot-Prozeß grundsätzlich für einen Dieselmotor nicht geeignet ist, muß bezweifelt werden. In Anbetracht der genialen Gesamtleistung ist das aber von untergeordneter Bedeutung.

Zum näheren Verständnis des eigentlichen Irrtums von Rudolf Diesel müssen wir uns eingehender mit diesem phänomenalen Carnot-Prozeß beschäftigen.

In Abb. 1 sind der vorgesehene Carnot-Prozeß, der Diesel-Prozeß an der Erstversuchsmaschine von 1897 und schließlich ein moderner Prozeß von 1951, bei dem die Hochaufladung erstmalig erfolgreich angewendet worden ist [4], vergleichend dargestellt.

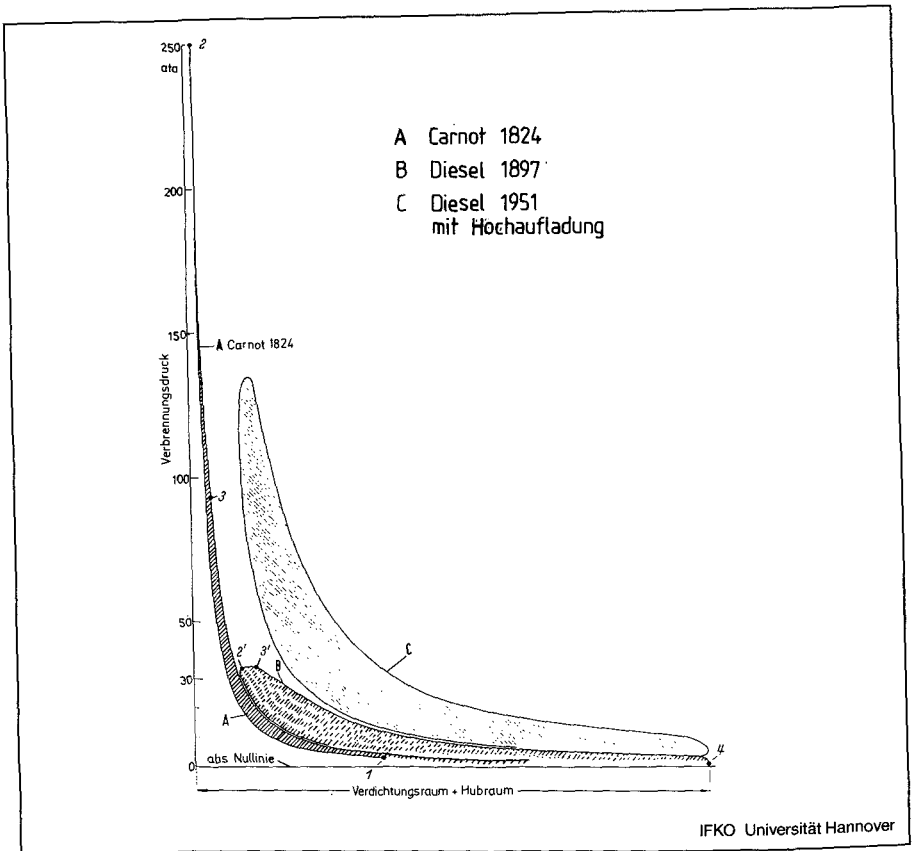
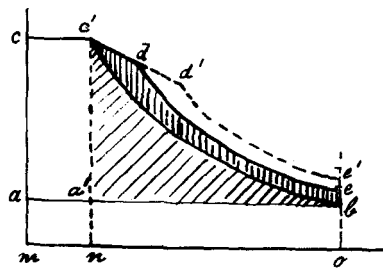


Abb. 1:
p,V-Diagramme zur Entwicklung des Dieselmotors 1824, 1897 und 1951
aus [4]

Es sei erlaubt, an dieser Stelle Professor Karl Zinners, des früheren Forschungsleiters der MAN und Ehrendoktors der Universität Hannover, zu gedenken, dem es 1951 mit der Hochaufladung gelungen ist, erstmalig einen Wirkungsgrad von 45% zu erreichen. Dies war ein Rekord, der über viele Jahre bestanden hat und der erst vor kurzem überboten worden ist.

Doch zurück zu Abb. 1. Bemerkenswert ist außer den hohen Drücken die Schlankheit des Carnot-p,V-Diagramms. Diesels eigene Diagramme, die aus der theoretischen Ausarbeitung vom Februar 1893 und von der zweiten nachgeschobenen Patentschrift stammen, sind in Abb. 2 dargestellt. Beide beziehen sich auf die Regulierung, die im oberen Bildteil auf einer Isothermen und im unteren Bildteil längs unterschiedlicher Zustandsänderungen erfolgt.



Diesel's theoretisches Indikatordiagramm mit
„verlängerten Admissionsperioden“ $c'd$ und $c'd'$
(Aus einer Handschrift Diesel's vom 8. Februar 1893)

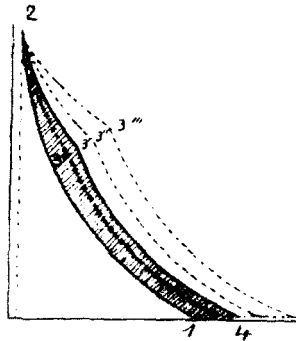


Fig. 6 der zweiten Patentschrift Diesel's,
Nr. 82 168 vom 30. November 1893

IFKO Universität Hannover

Abb. 2:

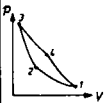
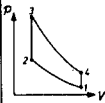
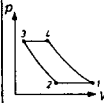
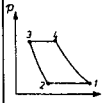
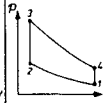
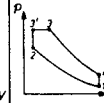
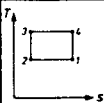
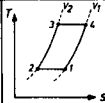
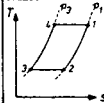
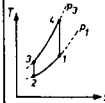
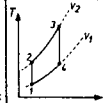
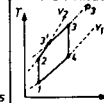
Diagramme von Rudolf Diesel

oben: Diesel's theoretisches Indikatordiagramm mit verlängerten Admissionsperioden $c'd$ und $c'd'$
(8. Februar 1893)

unten: aus der zweiten Patentschrift Diesel's 82 168 vom 30. November 1893

3. Einordnung des Carnot-Prozesses in die bekannten Vergleichsprozesse

Abb. 3 zeigt die bekannte Einordnung des Carnot-Prozesses im Vergleich mit dem Stirling-, Ericson-, Joule-, Otto- und Seiliger-Prozeß. Bei diesem Diagramm sei erinnert, daß der Carnot-Prozeß aus zwei Isothermen und zwei Adiabaten besteht und daß eine Regenerationsmöglichkeit, d. h. eine Ausnutzung der Abwärme nicht möglich ist. Die Bedingung für diese Regeneration ersehen wir aus den übrigen Diagrammen. Eine solche kann immer nur stattfinden, wie z. B. beim Sterling-Motor, wenn die Temperatur an der Stelle 4 größer als die Temperatur 2 ist, wie es beim Otto- und beim Seiliger-Prozeß im rechten Teil des Bildes angemerkt ist. Auf den Joule-Prozeß sei hier kurz hingewiesen; er besteht aus zwei Isobaren und zwei Adiabaten. Er ist für einen Motor noch besser geeignet als der Carnot-Prozeß.

Autor bzw. Erfinder	Carnot	Stirling	Ericson	Joule	Otto	Seiliger
Idealer Vergleichs-prozeß	Dampfmaschine	Heißluft-Kolbenmaschine	Heißluft-Strömungsmaschine	Heißluft-Strömungsmaschine	Verbrennungsmotor	Dieselmotor
Zustands-änderungen	2 Isothermen, 2 Adiabaten	2 Isothermen, 2 Isochoren	2 Isothermen, 2 Isobaren	2 Adiabaten, 2 Isobaren	2 Adiabaten, 2 Isochoren	2 Adiabaten, 2 Isochoren, 1 Isobare
p, V - Diagramm						
T, s - Diagramm						
Regenerat.-Bedingungen	nein	ja	ja	ja, wenn $T_1 > T_3$	ja, wenn $T_4 > T_2$	ja, wenn $T_4 > T_2$

IFKO Universität Hannover

Abb. 3:
Einordnung des Carnot-Prozesses und Vergleich mit Stirling-, Ericson-, Joule-, Otto- und Seiliger-Prozeß

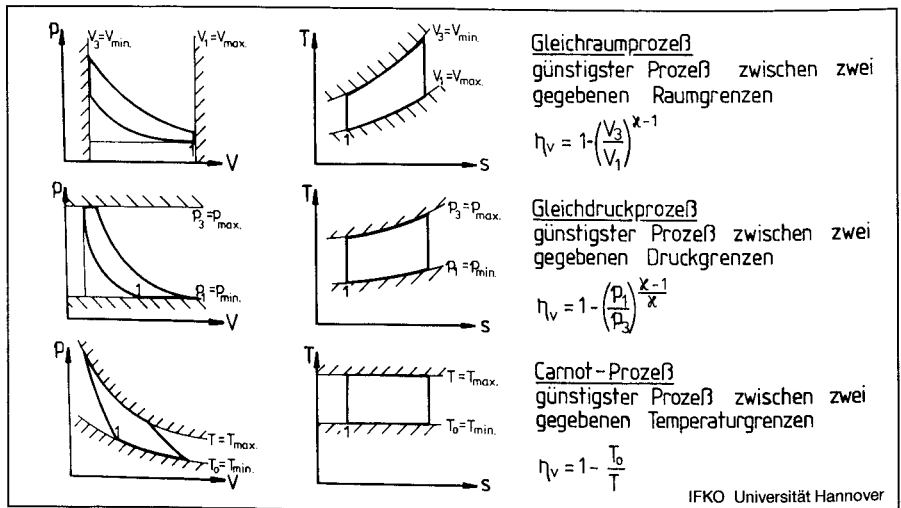


Abb. 4:
Vergleich des Carnot-Prozesses mit Gleichraum- und Gleichdruckprozeß nach [5]

Abb. 4 zeigt den Carnot-Prozeß in einer noch engeren Zuordnung zu den üblichen Verbrennungsmotorprozessen, wie z.B. dem Gleichraumprozeß im oberen Teil der Abbildung. Dieser ist der günstigste Prozeß zwischen zwei gegebenen Raumgrenzen. Der Wirkungsgrad η_v ist vom Verhältnis der Volumina V_3/V_1 und von der Stoffgröße κ abhängig. Der Gleichdruck-Prozeß ist der günstigste Prozeß zwischen zwei Druckgrenzen. Hier ist der Wirkungsgrad vom Druckverhältnis und wieder von den Stoffwerten abhängig. Der Carnot-Prozeß ist in diesem Zusammenhang der günstigste Prozeß zwischen zwei gegebenen Temperaturgrenzen [5], und der Wirkungsgrad ist nur vom Temperaturverhältnis abhängig. Beim Carnot-Prozeß müßte, wie in Abb. 5 zu sehen, die Energiezufuhr auf der Isothermen erfolgen. Praktisch könnte das stufenweise geschehen, wie im p, V - und T, s -Diagramm deutlich gemacht. Es würde jeweils eine Teilenergie bei konstantem Druck zugeführt werden, und danach würde zwischen den Energiezufuhren jeweils eine Entspannung auf einer Adiabaten stattfinden [5].

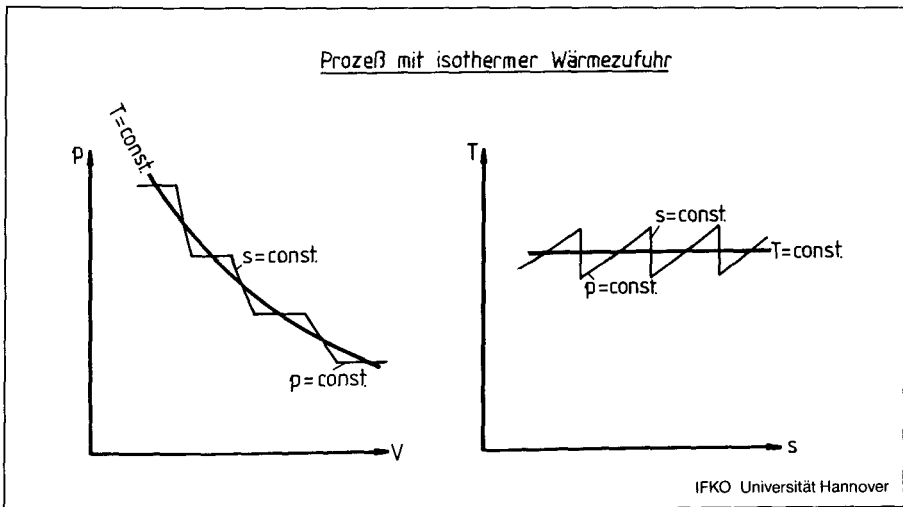


Abb. 5:
Mehrstufige Isotherme-Wärmezufuhr im p, V - und T, s -Diagramm

4. Thermodynamische Optimierung des Carnot-Prozesses für einen Verbrennungsmotor [6]

In Abb. 6 ist die p, V -Diagramm-Arbeitsfläche durch die Eckpunkte 1, 2, 3 und 4 gekennzeichnet. 1–2 liegt auf der unteren Isothermen T_0 , 3–4 auf der oberen Isothermen T . Der Mitteldruck p_m ist Arbeit durch Differenz des größten und kleinsten Volumens. In der nächsten Zeile sind die Druck- und Volumenverhältnisse und die Verknüpfung mit den Temperaturverhältnissen angegeben.

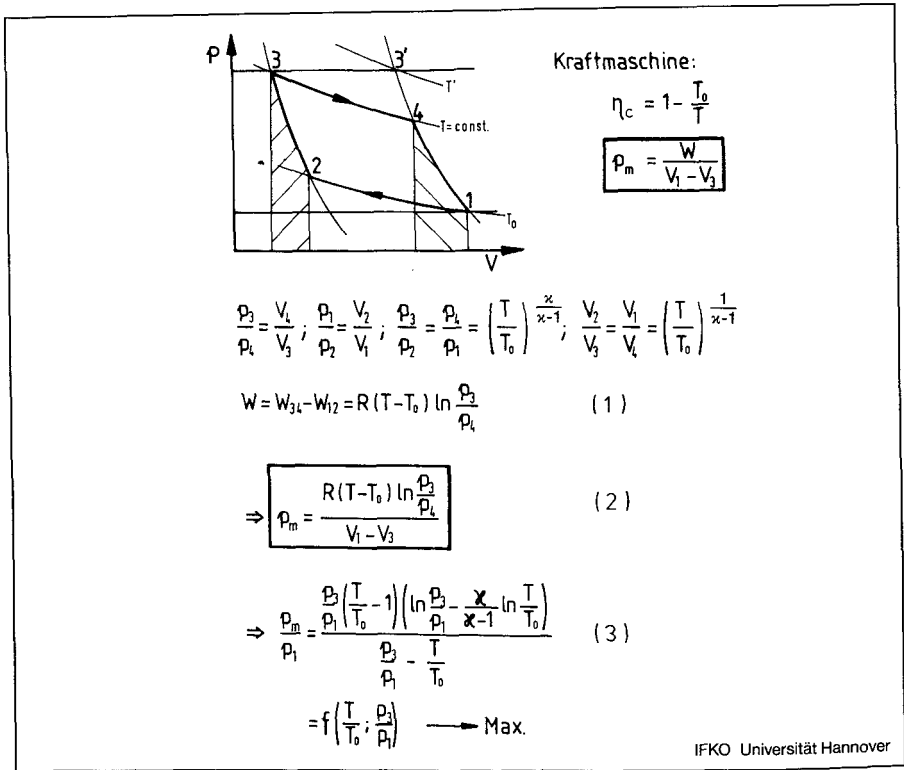
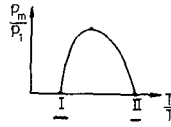


Abb. 6:
Ableitung des Mitteldruckes p_m des Garnot-Prozesses

Man kann dann die Diagrammfläche durch Integration ermitteln: Die Arbeiten unter den Linien 2–3 und 4–1 sind einander gleich, so daß Gleichung (1) für W übrig bleibt (T ist die Maximaltemperatur des Prozesses, T_0 die Minimaltemperatur). Daraus ergibt sich, in die Beziehung für den Mitteldruck eingesetzt, der Ausdruck p_m nach Gleichung (2). Wir können diesen Ausdruck so umwandeln, daß er für unsere Betrachtungen besser brauchbar ist, und machen den Mitteldruck dimensionslos, indem wir ihn auf den Anfangsdruck beziehen. So bekommen wir einen Ausdruck p_m/p_1 (Gl. (3)).

Der Verlauf des dimensionslosen Mitteldruckes über dem Temperaturverhältnis ist nun von großer Bedeutung (Abb. 7 oben). Es sei zunächst festgestellt, wo die Nullstellen dieser Funktion sind. Die Frage lautet: Wann ist p_m bzw. $p_m/p_1 = 0$? Das ist nach der Gleichung (1) der Fall, wenn die erste Klammer gleich 0 wird. Das trifft mit $T/T_0 = 1$ zu, wenn also kein Temperaturgefälle vorhanden ist. Dann muß die Arbeit gleich 0 sein, und zweitens, wenn wir den zweiten Faktor im Zähler rechts gleich 0 setzen. Das bedeutet: $\ln(p_3/p_1)$ ist gleich $\kappa/(\kappa-1) \times \ln(T/T_0)$ und, daß die beiden Isothermen zu einer Linie bzw. zu einem Punkt zusammenschrumpfen. Auch dann ist $W = 0$ und $p_m = 0$.

$$\Rightarrow \frac{p_m}{p_1} = \frac{p_3 \left(\frac{T}{T_0} - 1 \right) \left(\ln \frac{p_3}{p_1} - \frac{\kappa}{\kappa - 1} \ln \frac{T}{T_0} \right)}{\frac{p_3}{p_1} - \frac{T}{T_0}}$$



$\frac{p_m}{p_1} = 0$ wenn: I) $\frac{T}{T_0} = 1 \rightarrow$ kein Temperaturgefälle $\rightarrow W=0$

II) $\ln \frac{p_3}{p_1} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \ln \frac{T}{T_0} \rightarrow$ Isothermen schrumpfen zu einem Punkt $\rightarrow W=0; q_m=0$

Grenzwerte nach II) für $p_m=0; \kappa=1,4$:

$\frac{p_3}{p_1}$	20	40	60	80	100	150	200
$\frac{T}{T_0}$	2,36	2,87	3,22	3,50	3,73	4,18	4,54
η_c	0,575	0,651	0,689	0,714	0,732	0,761	0,780

Das Maximum von $\frac{p_m}{p_1}$ muß zwischen den Nullstellen dieser Funktion nach I); II) liegen.

Bei vorgegebenem $\frac{p_3}{p_1}$ ergibt es sich aus:

$$\left(\frac{\partial \frac{p_m}{p_1}}{\partial \frac{T}{T_0}} \right)_{\frac{p_3}{p_1}} = 0$$

IFKO Universität Hannover

Abb. 7:

Ableitung der Grenzfälle und der Extremfälle für Mitteldruck p_m und Wirkungsgrad η_c des Carnot-Prozesses

Für den Fall der rechten Nullstelle ist die Höchsttemperatur T auf die Temperatur T' in Abb. 7 angestiegen. Würde man noch weiter nach rechts gehen, würde sich der Prozeß umkehren, und aus dem Motor würde eine Kältemaschine. Auch dafür gelten die hier abgeleiteten Gesetzmäßigkeiten weiter.

Damit sind die überhaupt möglichen Grenzfälle gekennzeichnet. Zu bestimmten Druckverhältnissen, die nach Festigkeitsüberlegungen bestimmt werden müßten, ergeben sich maximal mögliche Temperaturverhältnisse, wie in der Tabelle „Grenzwerte nach II für $p_m=0$ “ zu sehen ist. Nehmen wir ein Beispiel daraus: p_3 möge, bezogen auf Atmosphärendruck, 100 bar sein. Dann ist das maximal mögliche Temperaturverhältnis im Carnot-Prozeß bis 3,73, und dabei ergibt sich der maximale Wirkungsgrad $\eta_{ca} = 0,732$.

Dies ist in der Tat ein sehr hoher Wirkungsgrad, und die Faszination des Carnot-Prozesses müßte für Verbrennungskraftmaschinen von diesen hohen Werten ausgehen.

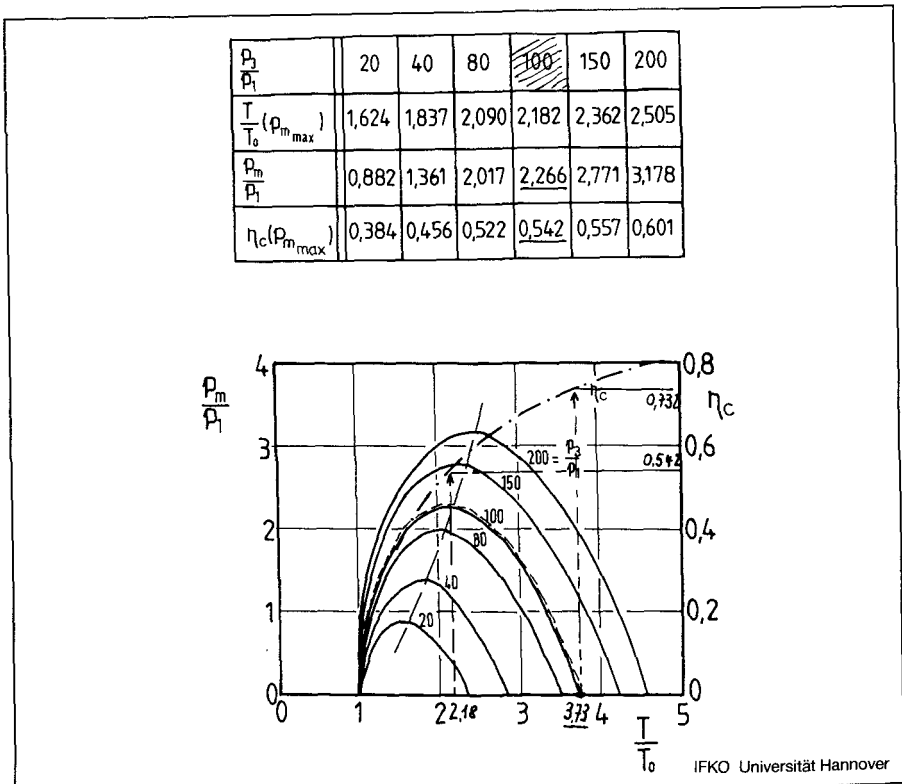


Abb. 8:

Grenz- und Extremfälle des Carnot-Prozesses für eine Verbrennungskraftmaschine

Man sieht aber, daß diese hohen Werte von η erreicht werden, wenn gerade der Mittel-
druck gegen 0 geht. Sie sind also für die Ausnutzung in einer Verbrennungskraftmaschine
wertlos.

Zwischen den beiden Nullstellen dieser Funktion muß es nun jeweils ein Maximum
des Mitteldruckes bzw. des Ausdruckes p_m/p_1 geben. Man kann rein formal dieses Maxi-
mum leicht finden, indem man die Funktion für p_m/p_1 nach Gl. (3) nach dem Tempera-
turverhältnis ableitet und die Ableitung gleich 0 setzt. Der Ausdruck steht auf Abb.7.

Man erhält aus dieser Ableitung das Temperaturverhältnis T/T_0 , also die Maximal-
temperatur des Prozesses zur Minimaltemperatur, für welche der Mitteldruck, bezogen
auf den Anfangsdruck, ein Maximum wird. Es ergibt sich aus der Ableitung eine Bezie-
hung, die hier nicht im Einzelnen abgeleitet wird. Nach Auswertung der Gleichung
ergibt sich statt dessen die Tabelle auf Abb. 8. Hier ist der Mitteldruck bezogen auf den
Anfangsdruck als Funktion des Temperaturverhältnisses aufgetragen, und als Para-
meter wird der bezogene Höchstdruck eingesetzt. Nehmen wir ein Beispiel: p_2/p_1 möge
100 bar sein. Die linke Nullstelle ist beim Temperaturverhältnis T/T_0 gleich 1, wie für

alle Drücke. Die rechte Nullstelle liegt dagegen bei einem Temperaturverhältnis von 3,73 (vgl. vorige Tabelle).

Das gesuchte Maximum des Mitteldruckes für einen Spitzendruck von 100 bar liegt der Tabelle entnommen bei 2,26 bar. Im Diagramm ist der Mitteldruck über dem Temperaturverhältnis aufgetragen. Die linke Skala ist die Mitteldruck-Skala, die rechte Skala ist die Skala des Wirkungsgrades des Carnot-Prozesses. Die strich-punktierte Linie zeigt den Verlauf des Carnot-Wirkungsgrades. Die dünne gestrichelte Linie verbindet die Maxima der Mitteldrücke miteinander. Nimmt man den Maximal-Mitteldruck für den Spitzendruck von 100 bar, so erhält man dafür den Tabellenwert für den Wirkungsgrad von 0,542. Dieser Wert ist zu vergleichen mit dem maximal-möglichen Carnot-Wirkungsgrad auf der Linie für 100 bar Spitzendruck, der nach der vorigen Tabelle bei 0,732 lag. Wenn von dem hohen Carnot-Wirkungsgrad gesprochen wird, haben die Thermodynamiker den Wert von 0,732 im Auge. Die Motorenbauer müssen jedoch mit 0,542 zufrieden sein. Abb. 9 verdeutlicht diese Misere: Die obere η -Linie (für $p_m \rightarrow 0$) hat einen beachtlichen Abstand von der realen Wirkungsgradlinie, die sich für jeweils $p_m = p_{m \max}$ ergibt. In dem soeben Erklärten besteht der eigentliche Irrtum, dem Rudolf Diesel zumindest vorübergehend verhaftet war.

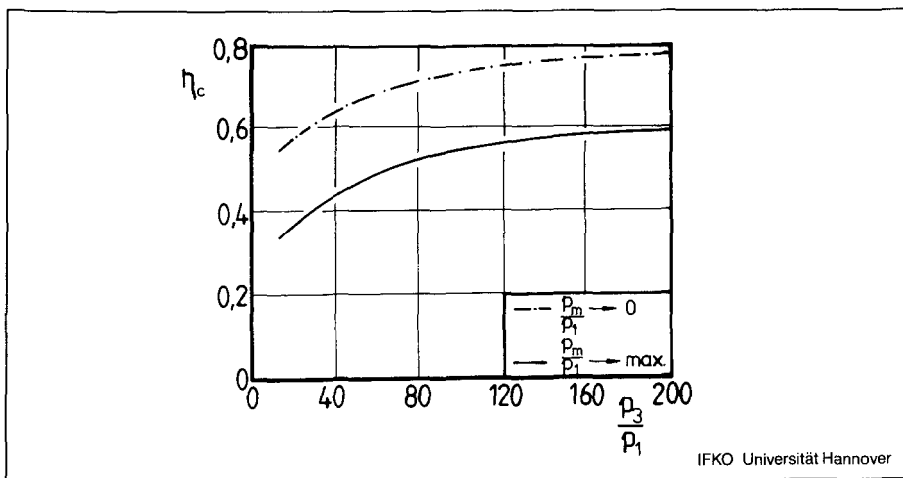


Abb. 9:

Wirkungsgrad η als Funktion des Maximaldruckes für höchste Temperatur T und für höchsten Mitteldruck p_m

5. Zusammenfassung der Optimierung

Die Optimierungsrechnung für den Carnot-Prozeß für einen Verbrennungsmotor zeigt:

1. Für jedes maximale Druckverhältnis im Zylinder gibt es ein maximal mögliches Temperaturverhältnis und damit einen Höchstwirkungsgrad.

2. Der Höchstwirkungsgrad wird erst an einer Nullstelle der Mitteldruckkurve erreicht. Der Motor müßte also ein unendlich großes bzw. ein sehr großes Hubvolumen haben, um überhaupt auf den berühmten Carnot-Wirkungsgrad kommen zu können.
3. Das Erreichen der hohen Carnot-Wirkungsgrade ist nur mit sehr hohen Druckverhältnissen bzw. sehr hohen Spitzendrücken im Zylinder erreichbar.
4. Die Energiezufuhr auf einer Isothermen bereitet Schwierigkeiten.

6. Schlußbetrachtung

Es ist nun nicht so, daß Rudolf Diesel nicht sehr bald die Wichtigkeit eines hohen Mitteldruckes erkannt hätte. 1913, in seinem Todesjahr, erschien ein von ihm verfaßtes Buch „*Die Entstehung des Dieselmotors*“ [7]. Der Inhalt hat verständlicherweise einen gewissen Rechtfertigungscharakter. Hier heißt es sinngemäß, daß der Kompressionsgrad so zu wählen ist, daß sowohl der Gesamtwirkungsgrad als auch die „Raumleistung“ gleichzeitig ungefähr ihr Maximum erreichen sollen.

Abb. 10 zeigt die Entwicklung der Spitzendrücke im Laufe von etwa 30 Jahren seit 1960:

Von 80 bis 90 bar sind die Werte auf 180 bar angestiegen. Rudolf Diesel scheiterte bei den beteiligten Geldgebern im ersten Anlauf für die Durchsetzung seiner Idee wegen der vorgeschlagenen 150 bar. Die Gesamtwirkungsgrade sind zwar prinzipiell nicht die des Carnot-Prozesses, aber aus Rudolf Diesels 16,6% (der mechanische Wirkungsgrad war leider nur 0,54), und dem späteren Nutzwirkungsgrad 26% sind heute immerhin rund 56% geworden.

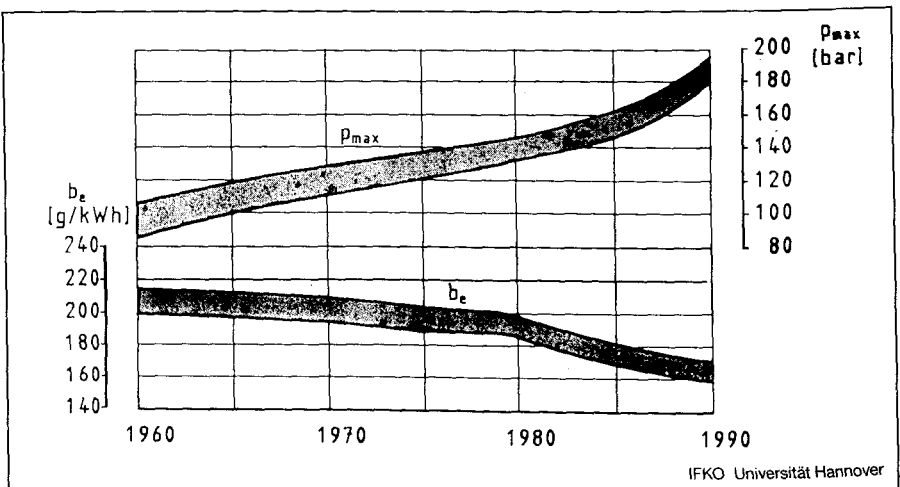


Abb. 10:

Entwicklung des spez. Kraftstoffverbrauches b_e und des maximalen Zylinderdruckes bei mittelschnellaufenden Dieselmotoren von 1960–1990

Sicher werden alle, diejenigen, die ihr Berufsleben der Entwicklung des Dieselmotors ganz oder teilweise gewidmet haben, aber auch unzählige andere empfinden wie der Augsburger Monteur jener Tage, dessen Geschichte zum Schluß berichtet sei: Der erste erfolgreiche Lastlauf des Versuchsmotors, den Diesel in Augsburg entwickelte, liegt viele Jahre zuvor.

In der heutigen Prüfstandshalle hatte man Diesel einen kleinen Raum eingerichtet. Das Schwungrad der Versuchsmaschine stand über Treibriemen mit der Werkstransmissionswelle in Verbindung. Die Maschine konnte auch von der Transmissionswelle aus angetrieben werden. Erst nach zweimaliger Umkonstruktion trat der Erfolg ein. Diesel selbst schildert das so: Der Monteur hatte seit Wochen den Lauf des Transmissionsriemens beobachtet, bei dem im Schleppbetrieb das obere Trum stets durchhing. An diesem Tage war nach ein paar Umdrehungen und einigen Manipulationen Diesels plötzlich das obere Trum straff. Der Monteur drehte sich um, wandte sich Diesel zu, zog seine Mütze und verneigte sich.

Literatur

- [1] Diesel, Eugen: Diesel. W. Heyne Verlag München 1983.
- [2] Meurer, Siegfried: Zum 125. Geburtstag von Rudolf Diesel – Mensch und Forscher. Vortragsmanuskript MAN Augsburg, 1983.
- [3] Mollenhauer, Klaus: 100 Jahre Diesel-Patent, ein Beitrag zur Biographie des Dieselmotors. Vortrag am 16. 6. 92 an der T.U. Magdeburg.
- [4] Sass, Friedrich: Geschichte des Deutschen Verbrennungsmotorenbaues von 1860 bis 1918. Springer-Verlag Berlin, Göttingen, Heidelberg 1962. Insbes. S. 384–412.
- [5] Kraemer, Otto und Jungbluth, Gerhard: Bau und Berechnung von Verbrennungsmotoren. 5. Aufl. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1983. S. 5–8.
- [6] Plank, Rudolf: Handbuch der Kältetechnik. Springer-Verlag Berlin, Göttingen, Heidelberg 1953. Insbes. S. 65.
- [7] Diesel, Rudolf: Die Entstehung des Dieselmotors. 1. Aufl. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1913.